

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНОЙ И ПЕЧНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

В.Г. Лисиенко, Н.Г. Лавров, М.Г. Близник

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»  
(г. Екатеринбург, Россия)

*Рассмотрена двумерная динамическая математическая модель сварочной дуги в терминах электротехнической теории цепей. На базе детерминированной модели разработана система управления, функционирующая в условиях априорной неопределенности, учитывающая влияние случайных возмущений различной природы. Показана возможность управления параметрами сварочного процесса на базе адаптивной модели построенной на фильтре Калмана. На основе модели процесса сварки предложена система управления, реализованная в программной среде Matlab. Показаны возможности стабилизации параметров сварочного процесса.*

**Ключевые слова:** электрическая дуга, автоматическая система управления напряжением дуги, обобщенная математическая модель динамической дуги, адаптивные системы управления, моделирование в программной среде Matlab.

*A two-dimensional mathematical model of the dynamic arc was considered in terms of the electrical circuit theory. A control system, operating under a priori uncertainty and taking into account influence of random disturbances of various nature, was developed on the basis of the deterministic model. A possibility of welding process parameter control, based on the adaptive model built on the Kalman filter, was shown. A control system, based on the welding process model, was proposed and implemented in the software environment Matlab. The possibilities of stabilizing the welding process parameters were shown.*

**Keywords:** electric arc, automatic arc voltage control system, generalized mathematical model of the dynamic arc, adaptive control systems, modeling in software environment Matlab.

### Введение

Обеспечение требуемого качества выпускаемых изделий – одна из основных задач технологов и конструкторов оборудования. С ростом научно-технического и технологического уровня производства возрастают и требования к качеству реализации процессов получения промышленной продукции.

Одной из основных задач производства сварных конструкций является поддержание уровня качества соединений по всей партии изделий одного типа. Наиболее сложную техническую задачу представляет реализация отработки возмущений, действующих в контуре электродинамической системы: источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) нашли широкое применение в черной металлургии для производства стали разных марок. В ДСП электрический режим процесса плавки нестабилен, что приводит к постоянным колебаниям мощности, вводимой в печь. Причины нестабильности носят технологический характер. Отклонения электрического режима от номинального снижают ее производительность и технико-экономические показатели [7].

Как в сварочных процессах, так и в дуговых сталеплавильных печах источником тепла, позволяющим реализовать процесс плавления металла, является электрическая дуга. Физическая сущность этих технологических процессов практически одинакова, отличие наблюдается в динамике процесса и характере технологических возмущений. В данной работе представлен синтез системы управления для установки сварки неплавящимся электродом в защитных газах, тем не менее, основные положения, касающиеся основного объекта управления – электрической дуги, относятся и к дуговым процессам в сталеплавильных печах.

Наиболее широко используемый и перспективный способ повышения качества технологических процессов – минимизация уровня технологических возмущений, а также оптимизация параметров режима.

Под влиянием возмущений в сварочной ванне изменяется топология температурного поля. Обработка возмущающих воздействий позволяет стабилизировать тепловые и энергетические характеристики, обеспечить постоянство или периодическое изменение процессов тепломассопереноса в электродинамической системе: источник питания – дуга – сварочная ванна – изделие. Электрическая дуга является нагрузкой с ярко выраженным нестационарным характером и характеризуется быстрыми изменениями. Дуга функционирует в условиях воздействия на систему многих неконтролируемых случайных возмущений, что требует в задачах управления достаточно сложных адаптивных алгоритмов.

Дуговой процесс можно считать стохастическим, так как на него действует большое количество возмущающих случайных факторов, которые в большинстве случаев являются неизмеряемыми и ненаблюдаемыми. Возмущения приводят к флуктуациям в электрической дуге, и, следовательно, изменяют ее электрические параметры. Флуктуации имеют случайный характер, поэтому целесообразно проводить анализ их влияния по статистическим оценкам. Приемлемой адекватной оценкой, позволяющей оценить интенсивность флуктуаций, является оценка дисперсии наблюдаемых значений тока сварки и напряжения дуги. При создании математических моделей электрической дуги различной степени сложности и точности широкое распространение получили методы, использующие вольтамперные характеристики (ВАХ).

На данный момент разработан широкий спектр моделей столба дуги, описывающих ее с различных точек зрения и с разной степенью детальности. К моделям, отражающим физические процессы, можно отнести: каналовую модель столба дуги [1], цилиндрическую модель столба дуги [1], двухтемпературную модель столба сварочной дуги [2], вихревую электродинамическую модель [2], термическую модель и т.д. [2, 3].

При моделировании систем автоматического регулирования широкое распространение получили динамические модели дуги, представляющие ее как нелинейный элемент электрической цепи, к ним относятся модели: Каси, Майра, Заруди, Шельгазе, математическая модель динамической дуги (ММДД) и т.д. [3, 4].

ММДД является наиболее общей математической моделью на основе энергетических параметров электрической дуги и может быть использована для любых видов статических вольт-амперных характеристик (СВАХ), мо-

жет быть распространена на различные случаи протекания процесса: дуг с изменяющейся длиной, движущихся дуг и дуг с продувкой газа. ММДД использует электротехнические термины, также в ее основе лежат представление сварочной дуги как нелинейного элемента цепи. Динамические свойства дуги модель описывает на основе статической вольт-амперной характеристики.

### Построение модели системы управления и электрической дуги

Предложена типовая схема системы управления установки для сварки неплавящимся электродом, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Установка имеет в своем составе: источник сварочного тока  $UZ_3$  с регулятором  $RA_3$ , поддерживающий закон изменения сварочного тока; привод перемещения горелки с источником питания  $UZ_2$ , регулятором  $RA_2$  и двигателем  $M_2$ ; а также привод перемещения каретки с источником питания  $UZ_1$ , регулятором  $RA_1$  и двигателем  $M_1$ . В систему включен датчик напряжения  $DU$ , обеспечивающий обратную связь по напряжению дуги и датчик тока  $DA_3$ . Предусмотрены датчики  $BR_2$  и  $BR_1$ , позволяющие обеспечить стабилизацию перемещения горелки и каретки.

Систему автоматического управления установки для сварки неплавящимся электродом можно описать следующей линейной системой дифференциальных уравнений, выраженной в приращениях.

Известно, что в сварочном контуре с неплавящимся электродом напряжение дуги связано с ее длиной функциональной зависимостью:

$$U_{\delta} = A + BL_{\delta} + \frac{C + L_{\delta}}{I_{\text{св}}}, \quad (1)$$

где  $U_{\delta}$  – напряжение на дуге,  $L_{\delta}$  – длина дуги,  $I_{\text{св}}$  – сварочный ток,  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты, учитывающие геометрические и физические свойства дуги.

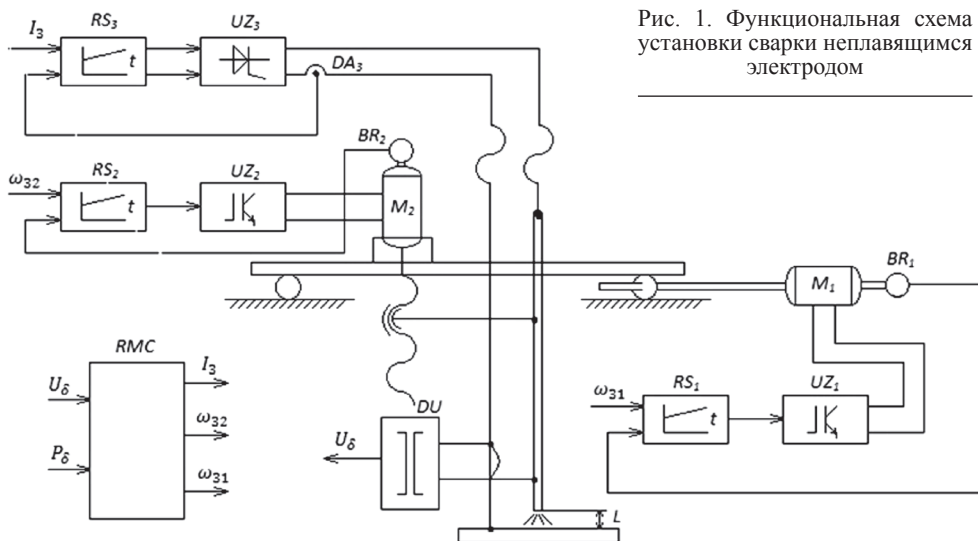


Рис. 1. Функциональная схема установки сварки неплавящимся электродом

Система источник питания – дуга может быть описана следующими уравнениями:

$$\begin{cases} U_d = U_{dd} + U_{dt} + \tilde{U}_d \\ U_d = k_d l_d \\ T_d \frac{dU_{dt}}{dt} + U_{dt} = k_{dt} i_d \\ l_d = l_{dv} + l_{dg} + \tilde{l}_d \end{cases} \quad (1a)$$

где  $U_{dd}$  и  $U_{dt}$  составляющие напряжения на дуге, зависящие от длины и тока дуги соответственно,  $k_d k_{dt}$  и  $T_d$  – передаточные коэффициенты и постоянные времени соответственно,  $l_{dv} l_{dg}$  – составляющие длины дуги, зависящие от скорости привода и глубины провара соответственно.

Модель выполнена в предположении линейности вольт-амперной характеристики в окрестностях рабочей точки для соответствующего режима технологического процесса, на основании обобщенной математической модели динамической дуги:

$$\theta \frac{di_0}{dt} + i_0^2 = i^2, \quad (2)$$

где  $\theta$  – постоянная времени столба дуги  $i_0$  – ток состояния дуги, т.е. ток, соответствующий установившемуся динамическому состоянию на ВАХ дуги, характеризующемуся током  $i$  [6].

Нелинейная статическая вольт-амперная характеристика  $i_0(u)$  может быть аппроксимирована следующим степенным выражением:

$$i_0(u) = I_0 \left( \frac{u}{U_0} \right)^{1/n}, \quad (3)$$

где  $I_0$  и  $U_0$  – ток и напряжение в фиксированной точке вольт-амперной характеристики [5].

Учет нелинейности статической вольт-амперной характеристики выполняется на основании предположения о том, что коэффициент  $k_{dt}$  имеет смысл дифференциального сопротивления дуги:

$$k_{dt} = \frac{U_{d.уст}}{I_{d.уст}}, \quad (4)$$

где  $U_{d.уст}$  и  $I_{d.уст}$  – установившиеся значения напряжения и тока дуги соответственно.

Это позволяет  $k_{dt}$  связать с аппроксимированной степенной функцией ВАХ следующим отношением:

$$k_{dt} = \frac{dU(i_0)}{di_0}. \quad (5)$$

Очевидно, что  $k_{dt}$  в модели существенно зависит от координат расчетной точки на статической ВАХ  $I_0$  и  $U_0$ .

Уравнение (10) можно представить и по-другому. В исходном состоянии в начале процесса  $\Delta I = 0$ , т.е. при нулевых начальных условиях процесс можно представить как линейный.

$$K_{dt} = b\Delta I + c$$

$$c = n \frac{U_0}{I_0^n} (I_0)^{n-1}$$

(6)

$$b = \frac{U_0}{I_0^n} n(n-1)(I_0)^{n-2} \Delta I$$

$$I_0 = I_0 + \Delta I$$

Коэффициенты  $c$  и  $b$  получены разложением в ряд уравнения (5), таким образом, коэффициент  $k_{dt}$  можно выразить следующим уравнением:

$$k_{dt} = \frac{U_0}{I_0^n} n(I_0 + \Delta I)^{n-1} + \frac{U_0}{I_0^n} n(n-1)(I_0 + \Delta I)^{n-2} \Delta I, \quad (7)$$

где  $n$  – показатель степени (в случае разрабатываемой модели  $n = -1/3$ , для свободно горящих дуг),  $I_0$  и  $U_0$  – рабочие точки (центральные точки)  $\Delta I$  – приращение тока в окрестностях рабочей точки. В построенной модели  $I_0$  и  $U_0$  рабочие точки носят смысл параметров первоначально настраиваемого режима сварочного процесса.

В качестве инструмента моделирования использован пакет прикладных программ MATLAB. На рис. 2 представлена блок-схема модели системы регулирования с решателем.

Изменение коэффициента  $k_{dt}$  в разных рабочих точках оказывает существенное влияние на характер переходных процессов, что согласуется с результатами моделирования на полученной модели. Результаты моделирования показали, что при использовании решателя в модели происходит сглаживание переходного процесса, уменьшается перерегулирование, снижается время переходного процесса (рис. 3).

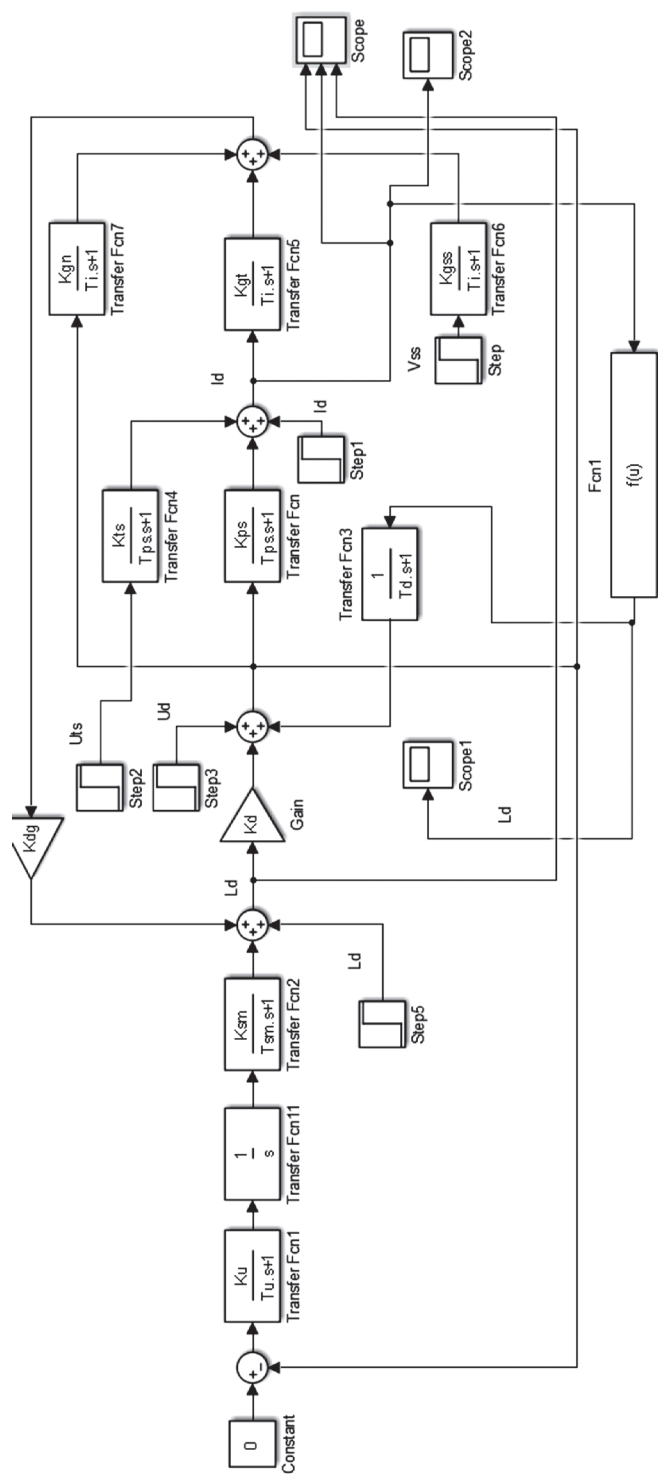


Рис. 2. Блок-схема системы автоматического управления процессом сварки с решателем

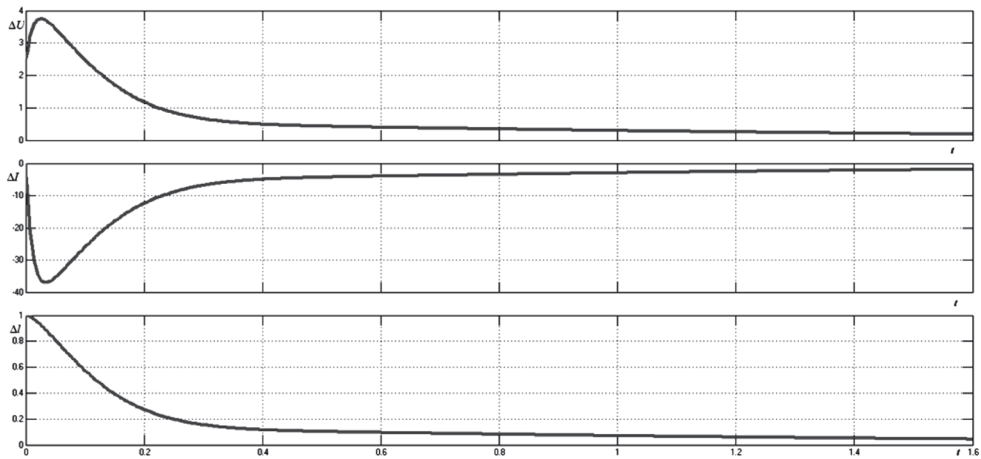


Рис. 3. Переходные процессы в системе с динамически изменяющимся коэффициентом  $k_{dt}$  (с решателем в системе)

### Системы оптимального управления

При построении оптимальных алгоритмов обработки сигналов используются статистические модели сигналов и шумов. Формирование моделей основано на принципах линейности и стационарности, а также нормальности шумов. На практике реальные объекты, как правило, не линейны и не стационарны. Решением проблемы является использование адаптивных алгоритмов, которые позволяют системе подстраиваться под статистические параметры входного сигнала.

Для решения задач оптимального управления требуется математическая модель объекта, описывающая его динамическое поведение под влиянием управляющих воздействий с учетом текущего собственного состояния. Внутреннее состояние системы в большей части случаев недоступно для измерения. Фильтр Калмана – последовательный рекурсивный алгоритм, использующий принятую модель динамической системы для получения оценки, которая может быть существенно скорректирована в результате анализа каждой новой выборки измерений во временной последовательности. Этот алгоритм находит применение в процессе управления многими сложными динамическими системами [8].

Объект управления представляют в матричной форме следующей системой:

$$\begin{cases} \dot{x} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}_1\bar{w} + \bar{B}_2\bar{u} \\ y = \bar{C}\bar{x} + \bar{D}\bar{u} \end{cases},$$

где  $x$  – вектор переменных состояния,  $u$  – вектор управления,  $y$  – выходных переменных,  $w$  – вектор возмущений,  $A$  – состояния системы,  $B_2$  – матрица входа,  $B_1$  – матрица возмущений,  $D$  – матрица обхода.

Матрица  $A$  не имеет собственных чисел в правой полуплоскости, но имеет одно собственное значение на мнимой оси, что определяет объект управления, как находящийся на границе устойчивости, что допустимо.

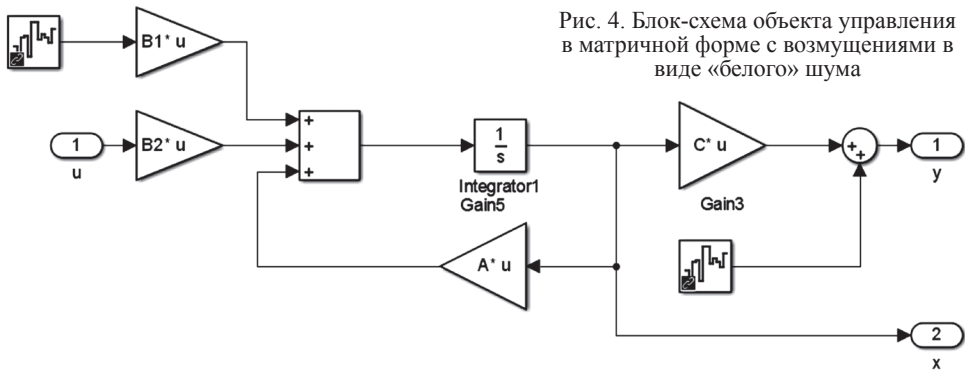


Рис. 4. Блок-схема объекта управления в матричной форме с возмущениями в виде «белого» шума

Наблюдаемость и управляемость объекта управления можно оценить, определив матрицы наблюдаемости и управляемости второго рода, и определить их ранг. В нашем случае порядок системы  $n = 5$ . В результате вычислений в системе MATLAB получили матрицы:  $r_w = 5$ ,  $r_m = 5$ . Таким образом, исследуемая система является как управляемой, так и наблюдаемой.

В процессе проведения экспериментов с разработанной моделью (рис. 3, 4) получены следующие результаты: модель с высокой точностью воспроизводит поведение наблюдаемой системы как по шумам измерений, так и по возмущениям, действующим на систему. График действующих возмущений на систему практически совпадает с сигналом системы, моделирующей эти погрешности.

Результаты моделирования показывают, что разработанная модель оптимального регулятора позволяет реализовать процессы управления в реальных условиях технологического процесса. Система автоматического регу-

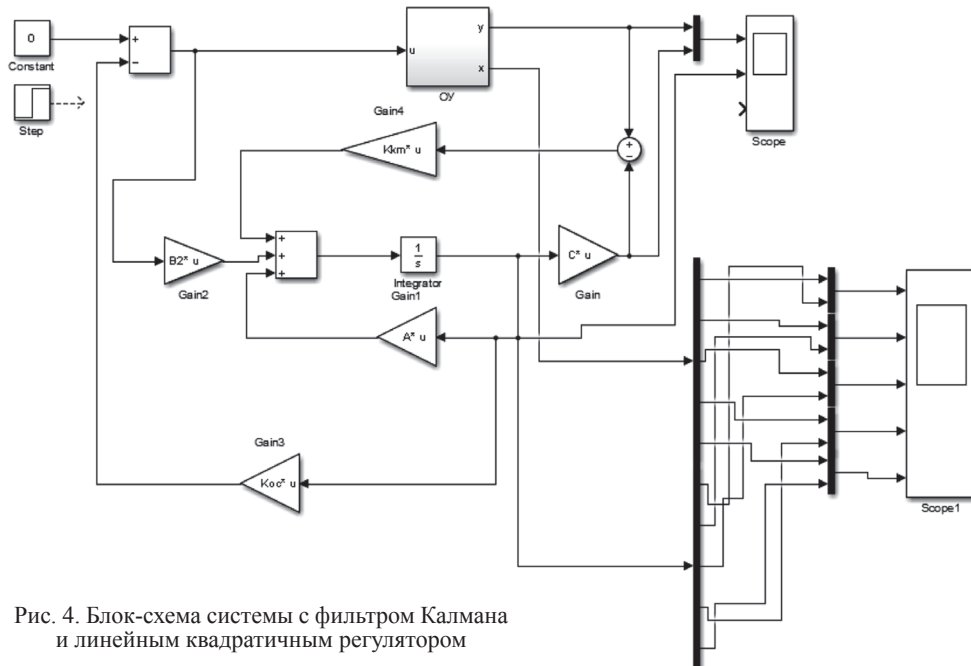


Рис. 4. Блок-схема системы с фильтром Калмана и линейным квадратичным регулятором



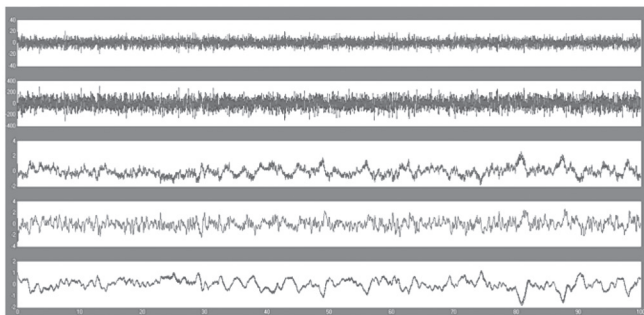


Рис. 5. График возмущений по напряжению, току, длине дуги, напряжению внешней питающей сети и скорости сварки в объекте и его модели

лирования работоспособна и при подборе значений матриц  $Q$  и  $R$  можно добиться «наилучшего» процесса регулирования (рис. 5). При увеличении значения матрицы  $R$  (в настоящем случае скаляр) увеличивается время переходных процессов, поэтому целесообразно оптимизировать значения ковариационной матрицы  $Q$ .

### Выводы

В работе показано, что наиболее адекватной и оптимальной моделью с точки зрения синтеза систем автоматического регулирования является обобщенная математическая модель динамической дуги. Модель базируется на представлении дуги, как нелинейного сопротивления в контуре источник питания – дуга. Результатом работы является модифицированная математическая модель динамической дуги. Получена формула, позволяющая динамически подстраивать коэффициент аperiodического звена автоматической системы регулирования в зависимости от режима сварки и возмущения по напряжению дуги. Показан подход к синтезу нелинейности в моделируемой системе. Рассмотрена возможность применения оптимальных регулирующих систем. Показано, что система оптимального управления, базирующаяся на фильтре Калмана-Бюсси, работоспособна и может быть реализована в условиях реальных технологических процессов.

### Список использованных источников

1. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
2. Степанов А.П., Сотокина Ю.В., Чернова С.А. Одномерные модели электрической сварочной дуги. Теория и практика сварочного производства // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2013. – № 2 (15). – С. 32–40.
3. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264.
4. Пентегов И.В. Математическая модель столба динамической электрической дуги. Автоматическая сварка. – 1976. – № 6. – С. 8–12.
5. Верещаго Е.Н., Костюченко В.И. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK // Электроэнергетика и электротехника. – 2013. – № 2. – С. 40–46.
6. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.
7. Исследование электромеханического регулятора мощности дуговой сталеплавильной печи с асинхронным электродвигателем / В.П. Рубцов, К.А. Елизаров, В.А. Елизаров // Вестник Московского энергетического института. – 2010. – № 5. – С. 54–60.
8. Синицын И.Н. Фильтры Калмана и Пугачева: Учебное пособие. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 640 с.